

Д.В. Соколова, Е.Г. Алексеева, К.В. Шеманаев

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ И НЕИЗУЧЕННЫХ ВОДОСБОРАХ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

D.V. Sokolova, E.G. Alekseeva, K.V. Shemanaev

**FEATURES OF TECHNOLOGY OF AUTOMATED FORECASTING
HAZARDOUS HYDROLOGICAL EVENTS IN UNGAUGED AND POORLY
GAUGED BASINS OF THE RUSSIAN FEDERATION**

Рассмотрены особенности технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации.

Ключевые слова: гидрологическая модель MLCM2, гидрологические прогнозы, малоизученные и неизученные водосборы, прогнозирование.

Features of technology of the automated forecasting of hazardous hydrological phenomena in ungauged and poorly gauged basins of the Russian Federation is considered.

Keywords: hydrological model MLCM2, hydrological forecasts, poorly gauged and ungauged basins, forecasting.

Введение

Опасные гидрологические процессы и явления могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций природного характера, способных нанести вред здоровью людей или окружающей природной среде, вызвать значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Опасными являются гидрометеорологические процессы и явления, определяющие формирование речного стока, включая опасные и катастрофические дождевые паводки и сезонные половодья.

В условиях изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки на речные водосборы статистические методы прогнозирования теряют свою эффективность, и единственным методом качественного прогнозирования наводнений становится математическое моделирование, эффективность которого во многом зависит от калибровки (параметризации) используемых гидрологических моделей [1].

Опасные гидрологические процессы в развитых (в гидрометеорологическом отношении) странах обычно прогнозируются в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Типовая прогностическая процедура, как правило, включает следующие элементы:

- автоматическое получение данных наземных, радарных и спутниковых наблюдений, а также выходных данных численных моделей погоды;
- автоматическую обработку данных, их усвоение и архивирование;

- предварительную калибровку и валидацию прогностической модели;
- запуск модели — выпуск и автоматическую рассылку прогнозов, а при необходимости — формирование и распространение оповещений о повышении гидрологического или метеорологического риска [7].

Технология автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации

Подобной структурой обладает технология, разработанная в РГГМУ в рамках НИР «Водосбор» (тема «Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации»), однако ее контент полностью адаптирован к условиям РФ.

Главной целью технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений малоизученных и неизученных водосборах является создание комплекса расчетных и технологических процедур, которые могут быть использованы в полностью автоматизированном режиме вне зависимости от степени гидрометеорологической изученности водосбора. Ключевые принципы технологии:

- прогнозирование выполняется по двухуровневому принципу: сначала осуществляется автоматическое фоновое прогнозирование стока для сравнительно крупных территорий, целью которого является выявление водосборов с повышенным уровнем риска формирования опасного гидрологического процесса или явления, а затем — уточненное прогнозирование стока. Этот подход позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы;
- массивы исходных данных для гидрологической модели формируются путем интегрирования разнородных данных [2];
- получение данных, контроль и анализ их качества, обработка, ассимиляция и архивирование выполняются в полностью автоматизированном режиме, что позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы;
- в качестве гидрологической модели используется усовершенствованная версия разработанной в РГГМУ модели Multi-Layer Conceptual Model 2 (MLCM2), которая может быть использована как для интерактивного, так и для полностью автоматизированного прогнозирования стока (было экспериментально установлено, что эта модель обладает большей прогностической эффективностью, чем американская модель «Сакраменто»);
- калибровка и валидация модели MLCM2 выполняются в полностью автоматизированном режиме.

Основными элементами данной технологии являются:

1. Блок получения и первичной обработки данных (с программным обеспечением, предназначенным для анализа и контроля качества поступающих данных и их первичной обработки).

2. База данных (с программным обеспечением, предназначенным для архивирования данных в оригинальном и исправленном виде, а также документирования и протоколирования всех выполняемых процедур). Для этой цели использована база данных аппаратно-программного комплекса «INWADA», разработанная в рамках АВЦП Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2013 гг.)», № 2.1.1/9901 «Автоматизированная система краткосрочного прогнозирования паводков и половодий».
3. Блок расчетов и прогнозирования (включает процедуры количественного и качественного оценивания степени гидрологической изученности речного водосбора, модель для фоновых и уточненного прогнозирования дождевых паводков и сезонных половодий на неизученных и малоизученных водосборах, а также инструментарий для калибровки и валидации модели).

Блок получения и первичной обработки данных ориентирован на полностью автоматизированное использование следующих видов данных.

Спутниковые данные, использование которых позволяет заметно повысить эффективность прогнозирования паводков на малоизученных и неизученных водосборах. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования паводков представляют данные о влажности верхнего слоя почвы (до 2–5 см от поверхности), позволяющие корректировать начальные условия при моделировании стока.

Радарные данные позволяют значительно повысить пространственно-временную дискретность наблюдений за осадками и сделать ее достаточной для моделирования и прогнозирования катастрофических дождевых паводков при помощи концептуальных гидрологических моделей с распределенными параметрами. Для этой цели в РГГМУ был установлен современный доплеровский метеорадар METEOR DX50, позволяющий получать необходимые данные с шагом в несколько минут и избыточной (с точки зрения гидрологического прогнозирования) дискретностью.

Выходные данные мезомасштабных моделей погоды являются важнейшим элементом фоновых прогнозирования стока. В частности, их использование позволяет повысить заблаговременность фоновых прогнозов стока на 3–5 суток. В РГГМУ для этой цели используется модель WRF (Weather Research and Forecasting Model).

Обработка поступающих данных включает идентификацию пропусков и недопустимых символов, заполнение пропусков в соответствии с рекомендациями ВМО, ассимиляцию данных и формирование единых массивов данных об осадках и испарении. Выполняется автоматическое архивирование данных об осадках и стоке, находящиеся в открытом доступе на веб-сайтах зарубежных гидрометслужб, что позволяет выполнять исследования в области моделирования стока (включая паводки) в режиме, близком к реальному времени (с задержкой не более трех часов).

Основным инструментом поиска, передачи и архивирования данных является программа-краулер (от англ. *crawler* — ползающая форма, гусеница), которая отыскивает и архивирует необходимую информацию в заданном режиме. После этого первичные данные, имеющие различную пространственно-временную дискретность, размерность, а иногда опечатки и пропуски, проходят процедуры анализа и контроля качества (QA/QC), редактирования, ремасштабирования и усвоения. В результате

получаются регулярные откорректированные массивы данных с требуемой пространственно-временной дискретностью, которая зависит от специфики и целей прогнозирования [4].

Наличие динамической базы данных (БД) является обязательным условием действенного функционирования систем автоматизированного прогнозирования как «обычного» стока, так и опасных гидрологических процессов и явлений. Именно сюда поступают данные из различных источников, здесь они обрабатываются и архивируются и отсюда считываются прогностической моделью.

Метод прогнозирования дождевых паводков на неизученных и малоизученных (в метеорологическом и гидрологическом отношении) водосборах, предлагаемый нами, основан на использовании гидрологической модели MLCM2, испытания которой продолжаются в РГГМУ, «входом» которой служат данные, получаемые из различных источников (спутников, радаров, численных моделей погоды).

Концептуальная гидрологическая модель MLCM2

Гидрологическая модель MLCM2 (от англ. *Multi-Layer Conceptual Model, version 2* — многослойная концептуальная модель, вторая версия) является моделью типа «осадки — сток» с гибкой структурой и высоким уровнем концептуализации. С технической точки зрения при выполнении калибровки (параметризации) модели ее можно легко свести как к сравнительно простым моделям водосбора или руслового стока, так и к более сложным гидрогеологическим моделям, учитывающим гидравлические свойства почвогрунтов рассматриваемого водосбора.

Процедура моделирования стока состоит из двух основных функциональных элементов:

- 1) Формирование «входа» гидрологической модели MLCM2 может быть сделано как в ручном, так и в автоматическом режиме, путем использования данных наземных наблюдений или же посредством интегрирования данных дистанционного зондирования и «выхода» численных моделей погоды. В последнем случае (при прогнозировании стока с малоизученных в метеорологическом отношении водосборов) эти данные проходят процедуру усвоения с использованием сравнительно разрозненных наземных наблюдений. Автоматическое формирование «входа» гидрологической модели MLCM2 выполняется при помощи специального программного обеспечения. Обязательными являются оперативные данные о сумме осадков с дискретностью 1 ч, 6 ч, 12 ч или 1 сутки. При отсутствии таковых цели фоновое прогнозирование стока могут быть вполне удовлетворительно достигнуты путем использования в качестве входных данных модели MLCM2 «выходных» данных мезомасштабной синоптической модели WRF. Кроме того, нужны данные о полном испарении [2].
- 2) Настройка и непосредственное использование модели MLCM2: автоматическая калибровка гидрологической модели MLCM2 выполняется при помощи специально разработанного для этой цели оптимизационного алгоритма, который будет рассмотрен ниже. При необходимости крупные и средние водосборы разбиваются на более мелкие частные водосборы, однако индивидуальная калибровка

модели для таких водосборов не выполняется. Тем не менее процедура разбиения исходного водосбора на более мелкие все равно имеет смысл, если для каждого из них могут быть заданы «входные» осадки и имеется схема стекания воды по русловой сети к замыкающему створу. Для калибровки гидрологической модели MLCM2 необходимы синхронные массивы данных об осадках, стоке и полном испарении (по возможности, за разнообразные по водности годы). После калибровки выполняется валидация найденных параметров. Важно подчеркнуть, что для калибровки и валидации целесообразно использовать различные виды целевой функции.

«MLCM2.v2» является программным обеспечением, обладающим такими ключевыми опциями оперативной гидрологической модели, как оптимизация параметров (калибровка) и валидация. ПО «MLCM2.v2» по своим характеристикам соответствует требованиям ВМО [5].

Для решения проблемы параметризации моделей в ПО используется способ квазилокальной оптимизации в физически предопределенном районе области определения целевой функции — SLS (от англ. *Stepwise Line Search* — пошаговый линейный поиск, являющийся разновидностью шаблонной оптимизации). Базовый алгоритм имеет несколько модификаций, разработанных для калибровки прогностических моделей, применяемых для прогнозирования стока в различных условиях. Метод SLS является наиболее подходящим в случаях, если априорная (начальная) точка при квазилокальной оптимизации задана корректно, а водосбор достаточно хорошо освещен гидрометеорологическими наблюдениями [3].

Кроме того, в распоряжении пользователя имеется оптимизационный метод Нелдера—Мида (или симплекс-метод), который основывается на использовании техники нелинейной оптимизации (это вычислительный метод, применяемый для дважды дифференцированных и унимодальных задач). Метод использует понятие симплекса, то есть выпуклого многогранника с $N + 1$ вершиной в N -мерном пространстве. Данный метод определяет поведение функции в нескольких тестовых точках. Затем одна тестовая точка заменяется на новую, и процесс повторяется. Простейший шаг заключается в замене наименее подходящей точке другой, которая отражена через центр масс остальных N точек. Если она подходит больше, то мы пробуем экстраполировать значения экспоненциально вдоль линии. Если же новая точка ненамного лучше предыдущей, мы движемся пошагово в окрестности минимума, таким образом уменьшая симплекс до лучшей точки. Суть метода заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса вокруг точки экстремума [7].

В предлагаемом ПО можно произвести полную настройку параметров модели (рис. 1, 2). Пользователь может выбрать один из четырех методов калибровки: метод SLS, случайный перебор, осуществляемый при помощи встроенного генератора случайных чисел, метод Нелдера—Мида и расширенный метод Нелдера—Мида [6].

Также у пользователя есть возможность выбрать вид целевой функции для калибровки и валидации. В настоящее время пользователь может выбрать один из трех вариантов: среднеквадратическая ошибка, критерий S/σ и мультимасштабная целевая функция MSOF.

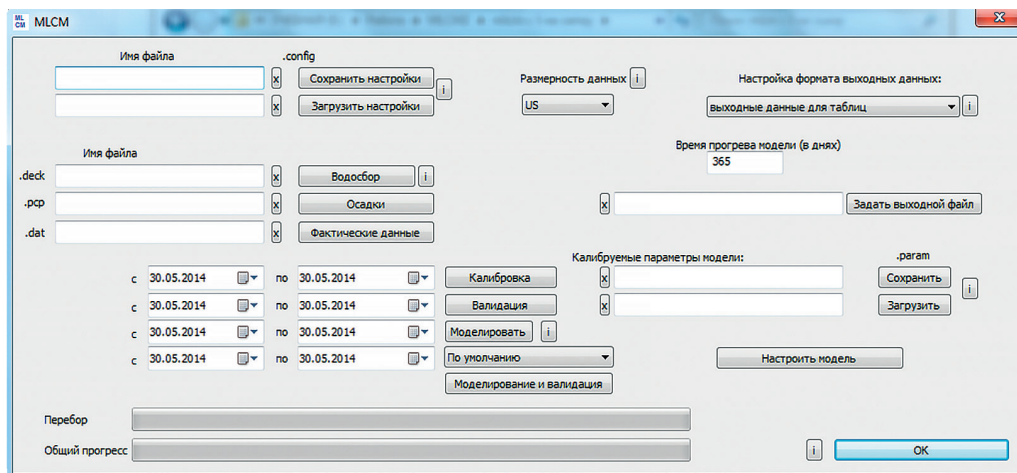


Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения «MLCM2.v2»

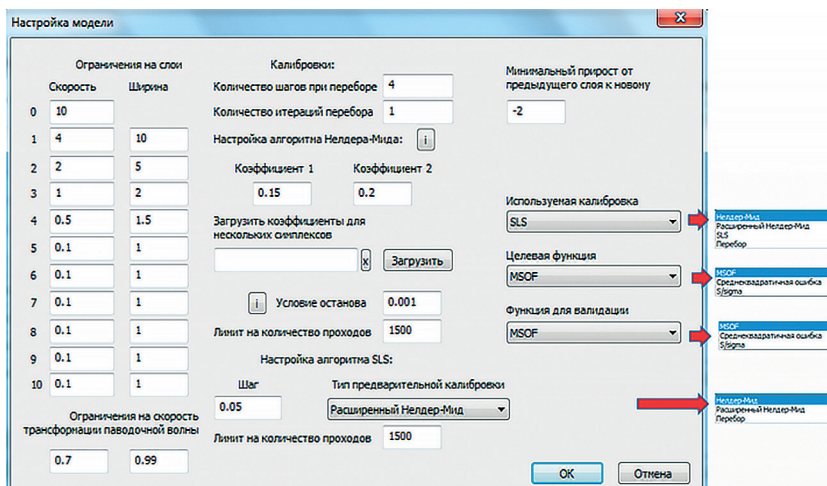


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения «MLCM2.v2»: настройки модели

Литература

1. Кузьмин В.А. Краткосрочное прогнозирование катастрофических паводков и паводков // Метеорология и гидрология. 2001. № 6. — С. 89–95.
2. Кузьмин В.А., Полякова А.А., Ерёмкина С.В. и др. Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 29. — С. 29–35.

3. Кузьмин В.А., Дикинис А.В. Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 22. — С. 16–27.
4. Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Макин И.С. и др. Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 22. — С. 38–44.
5. Соколова Д.В., Кузьмин В.А. Программное обеспечение «MLCM2» для прогнозирования дождевых паводков на малых и средних водосборах // Междунар. научно-исслед. журнал. Екатеринбург. 2015. № 7(38)-4. — С. 137–139.
6. Соколова Д.В., Кузьмин В.А., Симановская М.В. Программное обеспечение «MLCM2» для прогнозирования дождевых паводков на малых и средних водосборах // Учен. зап. РГГМУ. 2015. № 40. — С. 55–60
7. *The Guide to Hydrological Practices* (WMO No.168). Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. — WMO, Geneva, 2009. — 302 p.